

アモルファストランスの損失解析と洋上風力発電用コンバータへの適用に関する研究

著者	田中 秀明
号	61
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5340号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00122271

氏 名	たなか ひであき
授 与 学 位	田 中 秀 明
学 位 授 与 年 月 日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成29年3月24日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気エネルギーシステム専攻
適用に関する研究	アモルファストラランスの損失解析と洋上風力発電用コンバータへの適用に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 一ノ倉 理
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 石山 和志
	東北大学教授 中村 健二

論文内容要旨

大気汚染や地球温暖化などの問題は世界規模で深刻化しており、従来の大量生産・大量消費型社会から、環境と調和した持続可能型社会への転換が望まれている。エネルギー分野においても、環境に対するリスクが比較的高い火力や原子力などのいわゆる大規模集中型発電から、太陽光や風力、水力、バイオマスなどの再生可能エネルギーを利用した分散型発電への移行が望まれている。再生可能エネルギーの中でも、風力発電は発電コストが低く、スケールメリットが大きいと、大型風車を複数台設置した集合型発電施設（ウインドファーム）という形態で導入が進んでいる。また最近では、さらなる大容量化と出力安定化を目指し、洋上風力発電の検討も進んでいる。洋上風力発電の導入実績では現在欧州が大きく先行しており、総容量数十 MW～数百 MW のウインドファームが複数稼働しているが、我が国においても洋上風力発電の導入が検討されており、いわき沖や銚子沖において MW 級の洋上風力発電の試験が始まっている。このような大規模洋上風力発電の実用化においては、洋上で発電した大容量の電力を、陸地にある連系設備まで効率良く送電する技術も不可欠である。現在は、風力発電機からの出力を商用トランスによって昇圧して送電する、いわゆる高圧交流送電（HVAC）が主流であるが、トランスのサイズと重量が極めて大きくなるため、工事の手間やコストの増大につながる事が指摘される。また今後、陸上から数十～数百 km 離れた、より風況の良い遠洋にウインドファームが建設されることを想定すると、HVAC では送電損失の増大も懸念される。上述の問題に対して、最近では、高周波リンク DC-DC コンバータを用い、トランスを高周波で動作させることで小型軽量化を図り、さらに高圧直流送電（HVDC）によって交流送電時の損失の問題を解決する方式が検討されている。このような DC-DC コンバータに使用される絶縁・昇圧用のトランスとしては、動作周波数が数 kHz 程度であることから、アモルファス高周波トランスが適当であると考えられる。ただし、DC-DC コンバータの場合、トランスに印加される電圧は正弦波ではなく、デューティ比可変の方形波であることから、非正弦波で励磁された際のトランスの損失を定量的に算定する手法が必要不可欠である。ここで、トランスで生じる損失は銅損と鉄損に大別されるが、このうち鉄損は、磁気飽和や磁気ヒステリシ

スなどの複雑な磁気現象に起因するため、これを定量的に求めることは必ずしも容易ではなく、国内外の研究機関で様々な手法について検討が行われている。

磁気回路法は、起磁力と磁束の関係を電気回路における電圧と電流の関係と同様に扱うことで、機器内部の磁気現象を巨視的に解析する手法である。簡便な計算で機器の動作を把握することが可能であり、鉄心の非線形性も考慮できる。また、電気・電子回路や熱等価回路との連成解析も容易であるため、機器単体のみで無く、システム全体の解析・設計にも適用できる。磁気回路法による鉄損算定については、直流ヒステリシスをルックアップテーブルで表し、交流損失を周波数の 2 乗に比例する渦電流損、並びに 1.5 乗に比例する異常渦電流損で表す手法が提案されている。本手法を用いることにより、交流ヒステリシスループを高精度に算定可能であるが、直流ヒステリシスのメジャーループのみをルックアップテーブルで与えているため、マイナーループの計算ができないといった課題がある。したがって、マイナーループまで考慮可能な実用的な解析手法の確立が望まれる。

一方で、トランスの銅損について考えると、アモルファス高周波トランスの動作周波数が数 kHz 程度になることから、表皮効果や近接効果により銅損が増大することが懸念される。例えば、スイッチング回路向けなどの小容量高周波トランスにおいてはリッツ線を用いた銅損低減手法などが広く応用されているが、多くの巻線が必要な大容量高周波トランスにおいては、リッツ線は高価であり巻線占積率も低いことから、MW 級トランスの巻線にリッツ線を採用することは実用的ではないと考えられる。したがって、大容量アモルファス高周波トランスの銅損の分析とその低減策に関する検討も欠かせない。

さらに、トランスの設計においては損失だけでなく重量を考慮した設計が必要であるが、トランスの損失と重量はトレードオフの関係にある。したがって、鉄損と銅損並びにトランス重量を考慮したトランスの最適設計手法の確立が不可欠である。

以上述べたように、大規模洋上風力発電用 HVDC システムの実現には、大容量の DC-DC コンバータの開発が必須であるが、そのためには絶縁・昇圧用のアモルファス高周波トランスの銅損並びに鉄損の定量解析と低減に関する検討が必要不可欠である。

そこで本研究では、アモルファス高周波トランスの損失の定量解析と DC-DC コンバータへの適用に関する検討を行う。具体的には、まず鉄損の定量解析については、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に着目し、マイナーループまで考慮可能な磁気回路モデルの構築を行うとともに、計算精度の向上および計算時間の短縮に関する検討を行う。また、銅損に関しては、高周波化に伴う銅損増加の要因の分析と、それを抑制可能な巻線の形状と配置について考察する。次いで、MW 級 DC-DC コンバータの回路構成として、アモルファス高周波トランスの 2 次側を多巻線にすることで昇圧する方式を提案する。さらに、MW 級 DC-DC コンバータ用高周波トランスの初期設計に有用な簡易設計法を提案する。最後に、磁気ヒステリシスを考慮可能なトランスの磁気回路モデルと外部の電気・電子回路を連成することで、MW 級 DC-DC コンバータ全体の動解析を行う。本論文は以上の検討をまとめたものである。以下に各章の概略について述べる。

第1章 緒言

本論文の背景および目的について述べている。

第2章 磁気回路法に基づく損失解析の基礎

本章ではまず始めに、従来のインダクタンス素子を用いる鉄損算定法について述べている。同モデルは、磁気飽和および鉄損を考慮可能であることを示したが、ヒステリシスループの算定精度は低いこと、また鉄損係数が周波数により変化するので、その都度鉄損係数を決定する必要があることを明らかにした。次いで直流ヒステリシスをルックアップテーブルで与え、交流損失を渦電流損、並びに異常渦電流損を表す回路素子で与える鉄損算定法について述べている。実測値と計算値の比較により、同モデルは磁気ヒステリシスおよび鉄損を高精度に算定可能であることを明らかにした。一方で、同モデルはルックアップテーブルにメジャーループを用いていることから、マイナーループが計算できないこと、また同モデルを導出するためには、最大磁束密度の異なる種々の直流ヒステリシスの実測値が必要であることを明らかにした。

第3章 LLG 方程式を利用した磁気回路解析

本章では、LLG 方程式に着目し、マイナーループまで考慮可能な磁気回路モデルの構築を行うとともに、計算精度の向上および計算時間の短縮に関する検討を行っている。まず始めに、実測したいくつかのヒステリシスループから LLG 方程式のパラメータを決定することで、マイナーループまで含めた磁気ヒステリシスを表現できることを示した。しかしながら、高磁束密度下における算定精度が低いこと、また LLG 方程式は収束演算が必要であるため、計算時間が長大化することが明らかになった。これらの課題に対して、まず高磁束密度下における算定精度の向上については、磁性体の磁化過程の考察等に基づき LLG 方程式を改良した結果、ヒステリシスループ並びに電流波形の算定精度が向上した。次いで、計算時間短縮の検討においては、収束演算不要の計算手法であるプレイモデルに着目した。ここで、一般にプレイモデルの導出には最大磁束密度の異なる多数の実測したヒステリシスループが必要であるが、本論文ではプレイモデルの導出に必要なヒステリシスループを、LLG 方程式を用いて算定する手法を提案している。算定したプレイモデルを磁気回路モデルに組み込むことで、ヒステリシスループ並びに鉄損を高速・高精度に算定できることを明らかにするとともに、外部の電気・電子回路と連成することで、コンバータ回路の動作シミュレーションを行い、提案手法が応用回路などの動解析にも有用であることを明らかにした。

第4章 高周波トランスの巻線損失に関する考察

本章では、高周波化に伴うトランスの銅損増加を抑制する手法に関して検討している。まず、アモルファスト

ランスの高周波化に伴う銅損増加の要因について、有限要素法による磁界解析を用いて検討を行い、その原因は漏れ磁束による近接効果が主であることを明らかにした。次いで、近接効果の低減に有効とされる1層毎交互巻に着目し、磁界解析によって最適な巻線形状と巻線配置について検討を行った。その結果、薄い平角線を用いることで、高周波化に伴う巻線抵抗の増加をさらに抑制可能であることを明らかにした。さらに、容量5 kW程度の試作器を用いた検証を行い、その有用性を実証した。

第5章 MW級DC-DCコンバータの昇圧用トランスの概念設計

本章では、アモルファストランスのMW級DC-DCコンバータへの適用に関して検討している。まず、MW級DC-DCコンバータの昇圧回路の回路構成について検討を行い、多巻線方式を提案するとともに、計算および実験により、多巻線トランスにおいても1層毎交互巻が高周波化に伴う銅損増加の抑制に有効であることを明らかにした。次いで、MW級DC-DCコンバータ用高周波トランスの初期設計に有用な簡易設計法を提案した。さらに、3章で提案した磁気ヒステリシスを考慮可能なトランスの磁気回路モデルと外部の電気・電子回路を連成することで、MW級DC-DCコンバータ全体の動解析を行い、電圧波形、電流波形、損失の算定並びに2次電流に対する銅損、鉄損、電力、効率などの特性を算定可能であることを明らかにした。

第6章 結言

本章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、残された課題について述べている。

本論文では、磁気回路法とプレイモデルを組み合わせた、アモルファス高周波トランスの鉄損の定量解析手法を確立するとともに、高周波銅損を低減可能な巻線形状と巻線配置を明らかにした。また、これらの知見に基づき、MW級アモルファス高周波トランスの設計指針を明らかにした。本研究の成果は、我が国において導入が検討されている洋上風力発電の実用化に大きく寄与することが期待される。

今後は、本手法を制御系と組み合わせることにより、風車出力や系統電圧などが変動した際のDC-DCコンバータの動解析や、制御法の検討への適用が望まれる。また、本手法はトランスなどの静止器ばかりではなく、回転機にも適用可能であることから、例えばインバータ駆動されたモータのキャリア高調波に起因する鉄損の定量解析など、従来手法では算定が困難であった損失の定量解析への応用も期待される。

論文審査結果の要旨

風力発電の大容量化に伴い、日本においても洋上風力発電の導入が検討されており、いわき沖や銚子沖において MW 級の洋上風力発電の試験が始まっている。これらの発電システムでは、洋上に設置された変電所における昇圧トランスの小型軽量化が望まれている。そのため、発電した電力を直流に変換して陸上まで送る直流送電方式も検討されている。直流送電方式では昇圧コンバータが必要になるが、想定される送電電圧が数 10 kV～数 100 kV であるため最適な回路方式が確定していない。著者は、構成簡単で信頼性の高いトランス方式の DC-DC コンバータに着目し、最適設計に必要なアモルファストランスの鉄損解析モデルを構築するとともに、巻線損失の低減手法を明らかにし、小型のトランスを試作してその有効性を実証した。本論文はその成果をまとめたもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は緒言であり、本論文の背景および目的について述べている。

第 2 章では、鉄損算定に用いられていた磁気回路モデルの課題を明らかにしている。従来の磁気回路モデルは、直流ヒステリシスを与えるルックアップテーブルと、うず電流成分を与えるインダクタンス、および異常うず電流成分を与える従属電源で構成されるが、ルックアップテーブルを実測の直流ヒステリシス曲線から作成するため膨大な実験データを必要とすること、またルックアップテーブルではヒステリシス曲線のマイナーループが計算できないことを指摘している。

第 3 章では、2 章で指摘した課題を解決するため、LLG(Landau Lifshitz Gilbert)方程式ならびにプレイモデルに基づく直流ヒステリシス曲線の算定手法を与えている。まず実測したいくつかのヒステリシス曲線から LLG 方程式のパラメータを決定し、マイナーループも含めたヒステリシス曲線が計算可能であることを明らかにしている。ついで、LLG 方程式では計算時間が長大化することから、収束演算が不要なプレイモデルに着目し、プレイモデルの導出に必要なデータを LLG 方程式で計算する手法を考案している。導出したプレイモデルを磁気回路モデルに組み込むことで、アモルファストランスの鉄損を高精度に算定できることを明らかにしている。これは様々な回路条件におけるトランスの鉄損を高速に算定する手法であり高く評価される。

第 4 章では、高周波化に伴うトランスの巻線損失の増加を抑制する手法について述べている。まず、有限要素法による磁界解析に基づいて、高周波領域の巻線損失について検討を行い、数 100 Hz～数 kHz の動作周波数では近接効果によるうず電流損失が支配的であることを指摘している。ついで、近接効果の低減に有効とされる 1 層毎交互巻に着目し、磁界解析によって最適な巻線形状と巻線配置を明らかにし、5 kW 程度のアモルファストランスに適用してその有効性を実証している。これは実用上有用な成果である。

第 5 章では、アモルファストランスを MW 級の昇圧コンバータに適用するために必要な事項について述べている。まず、計算ならびに実験により、多巻線トランスにおいても 1 層毎交互巻が有効であることを明らかにしている。これに基づいて、入力 3.3 kV、出力 16.5 kV、容量 1 MW、スイッチング周波数 3 kHz の多巻線トランス方式 DC-DC コンバータの最適設計を行い、シミュレーションによって動作を確認している。設計した高周波アモルファストランスの質量は従来の商用周波トランスの 1/30 で、効率は 99.7%と算定された。これは洋上風力発電における昇圧トランスの小型軽量化に寄与する優れた成果である。

第 6 章は結言であり、本研究で得られた成果について述べている。

以上要するに本論文は、アモルファストランスの高速・高精度な鉄損算定手法を与えるとともに、高周波巻線損失の抑制方法を明らかにし、MW 級の洋上風力発電システムに有用なトランス方式の DC-DC コンバータを提案したもので、電気機器工学およびパワーエレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。